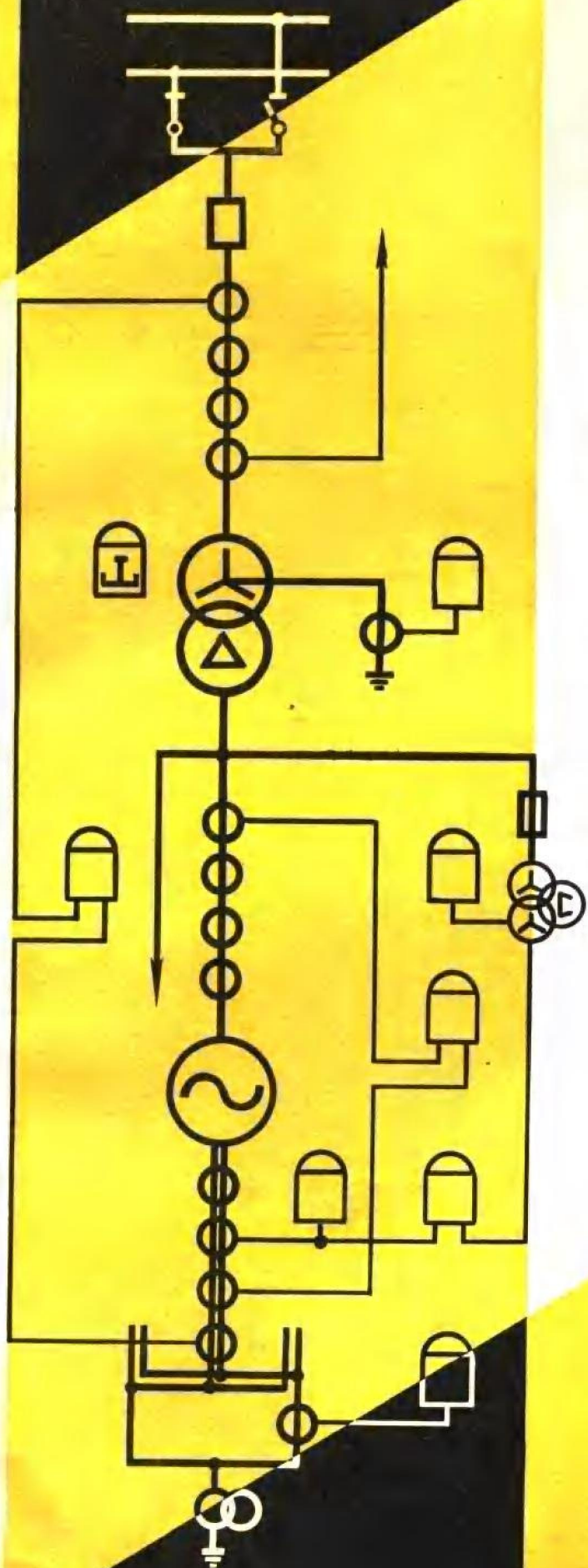


大型机组 继电保护 理论基础

王维俭 侯炳蕴
编 著

水利电力出版社



内 容 提 要

本书对大型发电机和变压器继电保护技术及其有关问题做了比较全面的论述。全书共分十章,包括:大型机组的特点及其对继电保护的要求、故障电量的分析和计算、发电机内部短路保护、变压器内部短路保护、短路故障的后备保护、定子接地保护、励磁回路接地保护、低励和失磁保护、负序反时限保护、过负荷保护、过励磁保护、过电压保护、逆功率保护、失步保护、电流回路断线保护及非全相运行保护等。

本书可供科研、设计、制造和运行部门以及大专院校继电保护专业的工程技术人员和教师阅读,也可供本专业的研究生和高年级学生参考。

大型机组继电保护理论基础

王维俭 侯炳蘊 编著

*

水利电力出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 33.25印张 754千字

1982年12月第一版 1982年12月北京第一次印刷

印数0001—7640册 定价3.40元

书号 15143·5002

前 言

由于大型发电机和变压器本身的一些特点及其对电力系统的安全运行有着重大影响,所以对这些电力设备的继电保护技术提出了较高的要求。不仅要求有完备的反应短路故障和反应异常运行状态的保护,还要求保护装置性能良好、简单可靠。生产实践提出来的这些要求,促进了大型发电机和变压器继电保护技术的发展。近年来,无论是在理论上还是在实践方面,都有了长足的进展,同时也提出了大量的需要进一步探索、研究、解决的问题。在这种形势下,我们撰写了大型发电机和变压器继电保护理论基础这本书,供从事继电保护工作的同志参考和研究。

继电保护的判据是构成继电保护装置的前提。判据的研究,是一项重要的基础工作。鉴于这一点,在本书中将把重点放在大型发电机和变压器继电保护的判据研究方面,试图在理论上作比较全面的分析和比较。

对于各种保护方案,我们力求在确切地介绍国内外的生产情况和研究成果的基础上,还进一步地进行一些讨论,但是这些意见和看法,可能和原方案的作者有某些分歧或出入,我们提出来的目的,一方面让读者了解这些技术问题的动态,另一方面希望有关部门或个人作进一步的研究,以期最终完善地解决这些问题。

本书第三、四、六章由王维俭同志编写,第五、八、十章由侯炳蕴同志编写,其他各章及附录由两人共同编写。

由于作者水平有限,对某些问题研究不够深入,或收集的资料不够全面,书中难免有谬误和不当之处,欢迎读者随时批评指正。

袁季修同志校阅了全部书稿,提出了许多宝贵意见。还有许多同志提出了不少建设性的意见,在此一并致谢。

作 者

1981年11月22日

目 录

前 言

第一章 绪论	1
第一节 发电机单机容量的发展趋势	1
第二节 大型机组事故的统计和分析	2
第三节 大容量发电机的特点及其对继电保护的要求	4
一、设计方面	4
二、结构和工艺方面	5
三、运行方面	6
第四节 大型机组继电保护配置的讨论	6
一、要求及可能配置的保护装置	6
二、保护装置的控制对象	7
三、短路保护的配置	7
四、异常运行保护的配置	12
五、水轮发电机保护配置的特点	13
第二章 故障电量的分析和计算	14
第一节 计及过渡电阻时不对称短路的分析和计算	14
一、短路点过渡电阻对短路计算的影响	14
二、不对称短路时电压电流的分布和变化	16
第二节 稳态短路算法	20
第三节 考虑系统影响的大型机组短路电流计算曲线	27
第四节 自并励式发电机的短路电流计算	29
一、自并励式发电机短路电流的周期分量计算式	30
二、 T_{dK} 的分析讨论和实用计算	32
三、自并励式发电机的不对称短路实用计算	37
第五节 发电机定子绕组的内部短路	39
一、发电机内部短路电流的计算方法	39
二、发电机内部匝间短路计算实例	45
三、发电机内部短路实用计算方法的探讨	46
四、多分支发电机匝间短路的分支电流计算	49
五、发电机内部短路的暂态分析	51
第六节 转子二次谐波电流的分析和计算	59
第七节 变压器匝间短路的分析和计算	62
一、变压器匝间短路故障的新情况	62
二、变压器匝间短路的基本分析方法	64
三、变压器一匝短路的实用计算	68

第八节 自耦变压器外部短路的计算特点	71
一、自耦变压器外部接地短路计算	72
二、自耦变压器的正(负)序等效电路及其参数	75
三、三相三柱芯式变压器的零序磁路	77
四、三绕组自耦变的零序等效电路及其参数测定	78
五、 x_{G0} 呈现负值的讨论	79
六、三绕组全星形自耦变零序参数实例	81
第九节 分裂绕组变压器的短路计算	83
一、三相三柱径向布置双分裂绕组变压器的等效电路及参数	85
二、三相三柱轴向布置双分裂绕组变压器的等效电路及参数	85
三、单相双柱双分裂绕组变压器的等效电路及参数	89
第十节 系统振荡的电气量分析	91
一、系统振荡的电流电压	91
二、系统振荡的阻抗轨迹	94
三、短路伴随系统振荡的电流电压	97
第十一节 电流互感器的暂态特性	100
一、励磁电流 i_μ	100
二、饱和倍数 n_s	101
三、暂态磁密系数 K	104
四、二次暂态电流 i_2	108
五、 $i_\mu > i_2$ 的情况	111
第三章 发电机内部短路保护	113
第一节 概述	113
第二节 纵差保护灵敏度的提高	113
第三节 发电机的匝间短路保护	117
一、发电机定子绕组的匝间短路	118
二、三元件式发电机横差保护	118
三、单元件式横差保护	120
四、负序功率方向匝间短路保护	122
五、零序电压匝间短路保护	125
六、转子二次谐波电流的定子匝间短路保护	128
七、定子匝间短路保护小结	129
第四节 多分支“分布中性点”接线方式的大型发电机保护	130
一、多分支“分布中性点”发电机保护系统的二次交流回路	131
二、正常运行和外部短路时继电器的动作情况	132
三、气隙偏心时继电器的动作情况	132
四、发电机内部相间短路时继电器的动作情况	133
五、发电机一相匝间短路时继电器的动作情况	134
六、并联分支数 n =奇数时发电机保护的二次交流回路	135
七、匝间短路保护横差继电器的动作死区	136
八、气隙偏心时气隙不均继电器的动作试验	136

第五节 发电机内部故障的预测装置	139
一、局部过热的“故障预测”装置工作原理	139
二、有机涂料的应用	141
三、转子运行工况的预测	141
第四章 变压器内部故障保护	143
第一节 概述	143
第二节 变压器励磁涌流的波形分析	144
一、励磁涌流分析的几个基本原始数据	144
二、单相变压器励磁涌流的分析	146
三、三相变压器空载合闸时的励磁涌流	148
四、变压器三相接线方式对涌流的影响	152
第三节 三相涌流经电流互感器的传变	156
一、电流互感器的激磁电流 i_μ	157
二、 LH 不饱和时涌流 i_1 的传变	158
三、在涌流 i_1 作用下, 电流互感器什么时候开始饱和	158
四、 LH 饱和后涌流 i_1 的传变	159
五、变压器差动保护防止涌流误动的措施	164
第四节 涌流经电流互感器和电抗变压器传变后的波形分析	164
一、当 LH 不饱和时	165
二、当 LH 饱和时	166
第五节 外部短路时差动保护不平衡电流的分析	171
一、稳态正弦电流下的不平衡电流	172
二、暂态过程中的不平衡电流	173
第六节 内部短路时差动保护的分析	176
一、 L 、 C 串联谐振电路的动态特性	178
二、双 T 滤波电路的动态特性	183
第七节 几种变压器差动保护的动态特性分析	187
第八节 变压器过电压(过激磁)对差动保护的影响	189
第九节 变压器匝间短路保护	190
一、变压器匝间短路保护的现状	190
二、负序功率方向保护	192
三、检测漏磁变化的变压器匝间短路保护	192
第十节 变压器局部放电的检测装置	196
第十一节 差动保护用电流互感器的几个问题	198
一、稳态情况下的误差问题	198
二、暂态情况下的误差问题	199
三、防止差动保护误动或拒动的综合措施	201
第五章 短路故障的后备保护	203
第一节 概述	203
一、大型机组对后备保护的要求	203
二、相邻母线和线路对后备保护的要求	204

三、后备保护的配置	204
四、后备保护装置	205
第二节 电流速断保护	206
一、用于消除差动保护死区	206
二、用作机端短路的后备保护	207
三、振荡电流的影响	207
第三节 全阻抗保护	208
一、利用相电流和相电压的全阻抗保护	208
二、利用正序和负序电流电压的全阻抗保护	208
三、全阻抗保护的整定值	212
四、全阻抗保护的特性分析	213
第四节 自并励发电机的后备保护	218
第五节 零序保护	220
一、中性点直接接地运行变压器的零序保护	220
二、中性点可能接地或不接地运行变压器的零序保护	221
第六章 发电机定子单相接地保护	225
第一节 概述	225
第二节 发电机的中性点接地方式	226
一、“百安”接地方式	227
二、小电流接地方式	227
第三节 定子单相接地时的基波零序电流和电压	231
一、单相接地时故障点的基波零序电流	231
二、单相接地时的基波零序电压	233
第四节 定子单相接地时的三次谐波电压	235
一、发电机空载运行时的三次谐波电势	235
二、电枢反应对三次谐波电压的影响	236
三、正常状态下机端和中性点的三次谐波电压 $\dot{U}_{s0}$ 和 $\dot{U}_{n0}$	241
四、定子单相接地时的三次谐波电压 $\dot{U}_s$ 和 $\dot{U}_n$	242
第五节 零序电流型定子接地保护	246
第六节 基波零序电压型定子接地保护	249
第七节 三次谐波电压型定子接地保护之一（绝对值比较方式）	251
一、按 $ \dot{U}_n \leq \dot{U}_s $ 为动作条件的定子接地保护	252
二、按 $K_s \dot{U}_n \leq \dot{U}_s $ 为动作条件的定子接地保护	254
三、按 $K_s \dot{U}_n \leq \dot{U}_n - \dot{U}_s $ 为动作条件的定子接地保护	255
四、按 $K_s \dot{U}_n \leq \dot{U}_n - \dot{K}_p \dot{U}_s $ 为动作条件的定子接地保护	257
第八节 三次谐波电压型定子接地保护之二（相位比较方式）	259
一、 $\dot{U}_n$ 与 $\dot{U}_n + \dot{U}_s$ 的相位比较	259
二、 $\dot{U}_n - K'_p \dot{U}_s$ 与 $\dot{U}_n + \dot{U}_s$ 的相位比较	261
第九节 外加电源方式的定子接地保护	262
一、外加直流电源的定子接地保护	263
二、外加20赫交流电源的定子接地保护	267

三、外加100赫交流电源的定子接地保护	268
第十节 定子接地保护灵敏度的标准问题	269
第七章 发电机励磁回路接地保护	271
第一节 概述	271
第二节 励磁回路一点接地保护	272
一、电桥式一点接地保护	272
二、迭加直流电压式一点接地保护	274
三、迭加交流电压式一点接地保护	276
四、迭加方波电压式一点接地保护	285
第三节 励磁回路两点接地保护	287
一、利用高频阻抗的两点接地保护	287
二、利用定子二次谐波电压的励磁回路两点接地保护	289
三、利用1/2次谐波的四极汽轮发电机励磁回路两点接地保护原理	300
第八章 低励、失磁保护	303
第一节 概述	303
第二节 低励和失磁过程中各电气量的表达式	304
一、各电气量的求解方法	304
二、各电气量的运算式	306
三、 $U_{fd}=0$ 失磁过程中各电气量的分析	311
四、 $U_{fd}=U_{fd0}$ 低励过程中各电气量的分析	318
第三节 研究低励和失磁过程的同步发电机等效电路	320
一、凸极同步发电机的等效电路	321
二、隐极同步发电机的等效电路	323
三、等效电路的比较	326
第四节 低励、失磁后的物理过程	327
一、失磁过程举例	328
二、失磁过程中的有功特性	329
三、失磁过程中的无功特性	340
四、失磁过程中定子电流电压的变化	341
五、失磁过程中励磁回路电流电压的变化	344
六、励磁回路的状态对失磁过程的影响	350
第五节 低励、失磁过程的阻抗特性	353
一、失磁过程在阻抗(或导纳)平面上的描述	353
二、失步前阻抗(或导纳)轨迹的分析	356
三、隐极同步发电机在阻抗(或导纳)平面上的静稳边界	358
四、凸极同步发电机在阻抗(或导纳)平面上的静稳边界	360
五、异步阻抗的分析	363
六、在阻抗(或导纳)平面上的等压边界	368
第六节 低励、失磁保护的主要判据及其检测元件	372
一、低励、失磁保护的主要判据	372
二、绝对值比较式低励、失磁继电器	374

二、平方-积分器式反时限元件	454
第十章 其他异常运行保护	459
第一节 概述	459
第二节 变压器的过励磁保护	460
一、变压器的过励磁	460
二、过励磁保护	462
第三节 发电机过电压保护	464
第四节 发电机过负荷保护	466
一、发电机的过负荷	466
二、定子绕组的过负荷保护	467
三、励磁绕组的过负荷保护	467
第五节 发电机失步保护	467
一、装设失步保护的必要性	467
二、对失步保护的要求	469
三、测量振荡中心电压的失步保护	469
四、利用双阻抗元件的失步保护	477
第六节 电流互感器的断线保护	480
第七节 逆功率保护	482
第八节 非全相运行保护	485
附录 A 发电机内部短路计算用基本参数	486
附录 B 发电机内部短路计算用电抗	489
附录 C 用几何均距法求变压器两绕组间的短路电抗问题	491
附录 D 变压器匝间短路的漏磁分析	494
附录 E 发电机三次谐波等效电路	497
附录 F 同步发电机的转子运动方程式	502
附录 G 考虑转子热传导的表面温升公式	503
附录 H 系统振荡阻抗轨迹通用圆图	508
附录 I 大型机组在有限系统中失磁的分析计算	510

第一章 绪 论

第一节 发电机单机容量的发展趋势^[2]

世界上自1955年投入第一台20万千瓦机组，到1965年第一台100万千瓦机组正式投入运行，这段时期大约每经4~5年火电机组的单机容量就翻一番。此后，单机容量的发展速度明显放慢，到1973年才投入第一台130万千瓦机组，成为目前世界上单机容量最大的机组。

单机容量迅速发展的主要原因是大容量机组的相对造价低、运行效率高、建设速度快。以20万千瓦机组的造价为100%，则其它各级容量机组的相对造价大致如下：

容量(万千瓦)	20	30	60	80	100	130
相对造价(%)	100	90	80	77	74	72

可见，单机容量超过100万千瓦时，相对造价的降低已不明显了。

以建设工期而言，两台60万千瓦机组的火力发电厂只有六台20万千瓦机组发电厂的60~70%。

以60万千瓦汽轮发电机与20万千瓦机组对比，除每千瓦造价平均下降20%外，每千瓦耗钢量和制造工时将减少15~20%，发电煤耗将降低约2.7%，每千瓦运行人员将减少约42%。

1965年百万千瓦机组正式运行以后，单机容量发展明显放慢的主要原因是由于大机组每年故障和计划检修停机时间都比较长，结果使大机组的可用率^①比中小机组低。根据美国的统计资料，可用率与单机容量的大致关系为

容量(万千瓦)	10~20	30~60	80及以上
可用率(%)	86	80	72.5

即使是在大机组运行比较成熟后，据日本的有关统计资料仍然表明，单机容量越大，可靠性越差，可用率越低。因此提高运行可靠性和可用率是进一步发展单机容量的关键问题之一。

我国动力资源十分丰富，特别是水力资源，更是急待开发利用。近年来，随着电力系统的不断扩大，水轮发电机和汽轮发电机的单机容量已分别发展到32万千瓦和60万千瓦。可以预计，迅速扩大发电机的单机容量不仅是电力工业发展的必然趋势，也是我国国民经济发展的客观需要。

本书所讨论的主要对象是20万千瓦及以上的汽轮发电机，15万千瓦及以上的水轮发电机，3万伏安及以上的同步调相机，以及与这些机组相适应的大型变压器。对有关故障过程分析、故障电量计算、保护原理等方面，对中型机组也是基本上适用的。

① 以 M_u 表示平均运转时间， M_D 表示平均停机时间，则可用率 = $\frac{M_u}{M_u + M_D} \times 100\%$

第二节 大型机组事故的统计和分析^{[1]、[3]、[4]}

大型机组比中、小型机组有着明显的经济效益，但也带来一些新问题，这主要是事故相对多了，特别是在大型机组投入运行的初期，由于缺乏经验，问题更多，这虽然是事物发展的一般规律，但是由于大型发电机组在整个国民经济活动中的重要地位，应该给予十分重视，其中一项必不可少的工作就是努力提高大型机组的继电保护水平。

以事故停机率 $p\%$ 表示设备的故障严重程度，定义为

$$p\% = \frac{\text{事故停机总小时数}}{\text{统计时间总小时数}} \times 100\%$$

美国大型机组事故停机率的统计资料见表1-2-1。由表可见，容量超过39万千瓦后，事故停机率的增加是十分惊人的，这主要是由于对大型机组的制造、安装、运行维护缺乏经验造成的。在1973~1974年日本日立制作所根据很多国家提供的资料作出的统计如图1-2-1所示，事故停机率 $p\%$ 已大幅度下降，但39万千瓦以上的大型机组的事故停机率还是比中、小型机组为高。

表 1-2-1 1960~1970年美国大型机组事故停机率

故障部分 容量(万千瓦)	机	炉	电	单 元
13~20	0.5	2.0	0.1	2.8
20~39	1.0	2.7	0.2	4.2
39~60	1.7	4.7	0.8	8.0
60以上	5.0	7.5	4.1	16.7

大型机组的事故停机时间中，根据欧洲16个国家的统计资料，电气事故约占10~20%，对于运行仅1~2年的个别机组，甚至高达61%。在电气事故中，法、波、苏格兰等国家和地区的发电机事故占90~100%。欧洲16国的电气部分事故中发电机和变压器事故次数统计资料见表1-2-2。从这个资料中可见，大型发电机事故在整个电气事故中所占比例极大，而且随着容量的增大，变压器事故有明显增长；同时也可以了解到，随着运行时间的

表 1-2-2 欧洲16国发电机、变压器事故次数的统计

事故部分 运行年数	10~13.9		14~19.9		20~27.9		28~39.9	
	发 电 机	变 压 器	发 电 机	变 压 器	发 电 机	变 压 器	发 电 机	变 压 器
1~2	79	1	67	0	44	16	53	15
3~5	45	0	51	26	95	2	97	0
6~12	62	0	52	5	75	0	—	—

增长，实践经验不断丰富，大型机组的事故已有所下降，特别是大型变压器事故已显著减少。

从以上资料中使我们知道，在发展大型机组的同时，必须注意尽量减少大型机组的事故发生率；在已经发生故障后，必须有性能完善的继电保护装置，最大限度地减轻机组的损伤和保持系统的安全运行。

我国1971~1977年发电机事故率（台次/百台·年）如表1-2-3所示，虽然事故率有所下降，但事故机组累计容量却有所增长，主要原因是新投产的10万千瓦及以上的大型发电机比较多，它们事故率相当高，尤其是75~77年间双水内冷发电机的事故台次占全部0.6万千瓦及以上发电机事故总台次的45.7%，以1975~1977年为例，5万千瓦及以上发电机事故共82台次，其中10万千瓦及以上发电机事故有32台次，可见十分重视大型机组的继电保护是完全必要的。

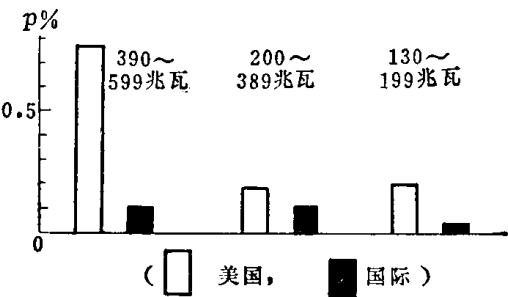


图 1-2-1 1973~1974 年汽轮发电机事故停机率

表 1-2-3 发 电 机 事 故 率 统 计

年 份	71	72	73	74	75	76	77
事故率(台次/百台·年)	9.23	4.82	4.34	5.46	4.2	3.5	4.1

近年来高压变压器的事故率有明显增加，主要原因是 220 千伏、容量较大的变压器广泛采用纠结式绕组，匝间绝缘厚度为1.35毫米（自耦变压器）或 0.95 毫米（非自耦变压器），绝缘水平和工艺水平不能满足纠结式绕组匝间电压较高的要求，因而高压绕组匝间绝缘破坏事故有所上升。我国变压器事故统计见表1-2-4。

表 1-2-4 变 压 器 事 故 统 计

出 厂 年 份	2.0~5.0		6.0~9.0		12.0~26.0	
	110	220	110	220	110	220
1971	1	0	0	0	0	4
1972	0	0	2	2	0	1
1973	3	0	0	3	0	1
1974	0	0	0	1	0	3
1975	3	0	0	1	0	2

可见，高压大容量变压器的匝间短路保护应该引起重视。

第三节 大容量发电机的特点及其对继电保护的要求

单机容量的增大,使大型发电机在设计、结构工艺、运行诸方面出现许多特点,相应地对继电保护提出了新的要求,下面分别扼要叙述之。

一、设计方面

1.有效材料利用率提高

大容量机组的体积并不随容量成比例地增大,以 TQN-100-2型10万千瓦汽轮发电机为基准,容量为20万千瓦的QFSS-200-2型汽轮发电机,定子重量只增加43%,转子重量只增加57%;容量为30万千瓦的QFS-300-2型汽轮发电机,定子重量只增加51%,转子重量也不过增加105%。

有效材料利用率提高的直接后果是机组的惯性常数 H 明显降低(表1-3-1),使发电机易于失步,因此大型发电机组更有装设失步保护的必要。

表 1-3-1 汽轮发电机组惯性常数的变化

机 型	$\cos\varphi$	GD^2	H (秒)	(%)
TQN-100-2	0.85	13	2.72	100
QFQS-200-2	0.85	23	2.4	88.2
QFS-300-2	0.85	29.5	2.06	75.7
QFSSQ-600-2	0.85	49	1.70	62.5

有效材料利用率提高的另一后果是发电机的热容量(瓦秒/ $^{\circ}\text{C}$)与铜损、铁损之比显著下降。例如20万千瓦及更小的发电机的定子绕组对称过负荷能力为1.5倍额定电流、允许持续运行120秒,转子绕组过负荷能力为2倍额定激磁电流、持续运行30秒;对于60万千瓦汽轮发电机,定子绕组过负荷能力规定为1.5倍额定电流、30秒,转子绕组过负荷能力为2倍额定电流、10秒。转子表层承受负序过负荷的能力(I_2^2t),中小型机组(间接冷却方式)为30(汽轮发电机)或40(水轮发电机),直接冷却方式的大型机组一般为3~8。为了在确保大型机组安全运行的条件下充分发挥机组的过负荷能力,定子绕组和转子绕组的过负荷保护、转子的负序保护都不能再沿用以往的定时限继电器,代之而起的是反时限特性的过负荷继电器和负序电流继电器。

2.电机参数的变化

电机参数的变化主要表现在 x_d 、 x_d' 、 x_d'' 等电抗普遍增大,定子绕组和转子绕组的电阻相对减小,其结果是:

(1) 短路电流水平相对下降,要求继电保护更灵敏。

(2) 定子回路时间常数 T_a 和比值 T_a/T_a'' 显著增大,使定子非周期电流的衰减大大变慢(中小型机组 $T_a \approx 0.10 \sim 0.16$ 秒,我国60万千瓦汽轮发电机 T_a 设计值约为0.345秒,而西德的60万千瓦汽轮发电机的 T_a 高达0.70秒),严重地恶化保护用电流互感器的工作特

性，也加重了不对称短路时转子表层的附加发热，使负序保护进一步复杂化。非周期电流的长期存在使暂态短路电流在若干周期内不通过零点，可能使断路器的断流条件恶化，有人据此提出使保护动作增长延时以便与短路电流过零点的时间相配合，这个措施显然与大型机组保护的快速性要求直接违背，而且三相电路的短路电流未必各相都是较长时间偏于时间轴的一侧，因此这个问题尚待研究。

(3) 由于 x_d 的增大，使发电机的静稳储备系数 K_{ch} 减小^①，例如一般中小型机组 $K_{ch} \approx 1.5$ ，而QFSS-200-2型机组降为0.7，因此在系统受到扰动或发电机发生失磁故障时，很容易失去静态稳定，有关保护必需注意这种情况的发生。

(4) 由于 x_d'' 、 x_d' 、 x_d 等参数的变大，使发电机平均异步转矩大大降低，例如一般中小型汽轮发电机的平均异步转矩的最大值可达额定转矩的2~3倍，而大型机组却只有近于甚至低于额定值，因此大型机组失磁异步运行的滑差大，从系统吸收感性无功多，允许异步运行的负载小、时间短，所以大型机组更需要性能完善的失磁保护。

(5) 由于 x_d' 增大，使大型机组在满载突然甩负荷时，变压器过励磁现象比中小型机组严重。

二、结构和工艺方面

这是电机制造上的特点，大型发电机不同于中小型机组的地方有：

(1) 由于大型机组的材料利用率高，就必须采用复杂的冷却方式，如氢内冷、水内冷等，实际运行说明这些直接冷却方式的发电机，故障率增加了。在铁芯通风方面，不仅有辐向通风槽，还有轴向通风槽、大齿横向通风槽（挠性槽）等，使铁芯检修困难，转子承受负序分量的能力降低，这将直接影响定子单相接地保护和负序反时限保护的设计方案。

(2) 单机容量的增大，汽轮发电机轴向长度与直径之比明显加大，这将使机组运行的振动加剧，匝间绝缘磨损加快，有时还可能引起冷却系统的故障，因此希望装设灵敏的匝间短路保护和漏水保护（对水内冷机组）。

(3) 单机容量的增大，使低速水轮发电机的直径特别庞大，例如美国大古力第三电站61.5万千伏安的发电机转子直径超过18米，但水轮发电机的气隙大小与其容量大小、机组尺寸并无多大关系，一般为15~25毫米，气隙大小的改变将影响同步电抗和励磁系统的工作，转子的偏心将使气隙不均而加剧振动，为此要求装设气隙不均保护，监视气隙的变化情况。

(4) 大型低速水轮发电机的定子绕组并联分支数多，每个分支电流不太大，但每相总电流很大，中性点三相引出方式是一个重要问题。若采用“分布中性点”（即将各分支的三相先分别接成分支中性点，然后将所有分支中性点接成一个总的发电机中性点引出机体外）或中性点侧没有引出三相六端子，则匝间短路的横差保护必须设计新方案。大型汽轮发电机的定子绕组，虽然并联分支数不多（2或4），但同样基于电机制造上的考虑，可能不在中性点侧引出三相六端子，也需有新的匝间短路保护。

① $K_{ch} = \frac{P_m - P_e}{P_e}$, $P_m = \frac{EU_d}{x_d}$, $P_e = P_m \sin \delta_e$ 中小型机组 $P_m/P_e \approx 2.5$; QFSS-200-2 $P_m/P_e \approx 1.7$ 。

三、运行方面

(1) 由于单机容量大, 发电机保护的拒动或误动均将造成十分严重的后果, 所以大型机组继电保护的技术指标要求更高。

(2) 大型机组的励磁系统更为复杂, 故障几率也多, 因此发电机的过电压或失磁故障和变压器的过激磁故障的可能性大了。如果采用可控硅自并励系统, 还要着重考虑后备保护灵敏度的问题。

(3) 对于异常工况的运行(例如低频运行、起动过程、失步、逆功率等), 大型机组要求装设相应的保护继电器。

(4) 大型汽轮发电机组的起停机特别费时费钱, 以停机 7 ~ 8 小时的热起动为例, 10 万千瓦机组约 2 小时, 30 万千瓦机组就得 7 小时。一台 15 万千瓦机组起动一次约损耗 408 百万大卡, 折合标准煤 58 吨。另外大型机组的突然跳闸, 有可能给主机和辅机造成程度不同的某些损伤。因此不在必需的情况下, 不使大型汽轮发电机组频繁起停, 更不轻易紧急跳闸停机, 这在设计保护出口电路时应注意。

(5) 大型机组多系发电机-变压器单元制接线, 机端和厂用分支一般均不设高压断路器。在发电机失磁后机端电压严重下降, 在设计保护时必须注意厂用电的安全。

综上所述, 发电机单机容量的增大要求大型机组的继电保护进一步完善化, 即提高原有保护的性能、探索多功能保护的新原理、研制故障预测保护装置, 应用计算技术, 以致使保护与电力系统的安全监视和综合自动控制相结合。

第四节 大型机组继电保护配置的讨论

一、要求及可能配置的保护装置

大型发电机的造价高昂, 结构复杂, 一旦发生故障遭到破坏, 其检修难度大, 检修时间长, 要造成很大的经济损失。例如, 一台 30 万千瓦汽轮发电机, 因励磁回路两点接地使大轴和汽缸磁化, 为退磁停机一个月以上, 姑且不论检修费用和对国民经济造成的间接损失, 仅电能损失就近千万元。大机组在电力系统中占有重要地位, 特别是单机容量占系统容量很大比例的情况下, 大机组的突然切除, 会给电力系统造成很大的扰动。

因此, 在考虑大机组继电保护的总体配置时, 比较强调最大限度地保证机组安全和最大限度地缩小故障破坏范围, 尽可能避免不必要的突然停机, 对某些异常工况采用自动处理装置, 特别要避免保护装置误动作和拒绝动作。这样, 不仅要求有可靠性、灵敏性、选择性和快速性好的保护继电器, 还要求在继电保护的总体配置上尽量做到完善、合理, 避免繁琐、复杂。

下面我们用工图 1-4-1 所示的汽轮发电机变压器组为例, 来讨论大机组继电保护配置方面的一些问题和特点。

大机组保护装置可以分为短路保护和异常运行保护两类。

短路保护, 用以反应被保护区域内发生的各种类型的短路故障, 这些故障将造成机组的直接破坏。这类保护很重要, 所以为防止保护装置或断路器拒动, 又有主保护和后备保

护之分。

异常运行保护，用以反应各种可能给机组造成危害的异常工况，但这些工况不能或不能很快造成机组的直接破坏。这类保护装置，一般都装设一套专用继电器，不设后备保护。

对图 1-4-1 所示的发电机变压器组，可能配置的保护装置，列于表 1-4-1 中。

在表 1-4-1 中把保护装置划分为 A 组和 B 组，两组保护装置在结构和配线方面，彼此保持独立。这样，在运行期间进行检测或维修继电器时，发电机变压器组仍保持有必要的保护装置。

应当指出，表 1-4-1 中所列出的仅是大型发电机变压器组可能装设的各种保护装置。对于不同容量等级、不同类型的发电机变压器组，各自应当具体装设哪些保护装置，应当根据有关规程或规定并按照实际情况决定。

二、保护装置的控制对象

各保护装置动作后所控制的对象，依保护装置的性质、选择性要求和故障处理方式的不同而不同。对于发电机双绕组变压器组，通常有以下几种处理方式：

全停：停汽机、停锅炉、断开高压侧断路器、灭磁、断开高压厂用变压器低压侧断路器、使机炉及其辅机停止工作。

解列灭磁：断开高压侧断路器、灭磁、断开高压厂用变压器低压侧断路器。

解列：断开高压侧断路器。

减出力：减少原动机的输出功率。

发信号：发出声光信号或光信号。

母线解列：对双母线系统，断开母线联络断路器，缩小故障波及范围。

在表 1-4-1 中，列出了各种保护装置在不同处理方式下的控制对象。

三、短路保护的配置

短路保护的配置，与一次接线形式有很大关系，仍以图 1-4-1 所示的发电机双绕组变压器组为例进行讨论。

1. 在高压厂用变压器高压侧引出线上要否装设断路器的问题

图 1-4-1 中，在厂用变压器高压侧引出线上，没有装设断路器，厂用变压器及其高低

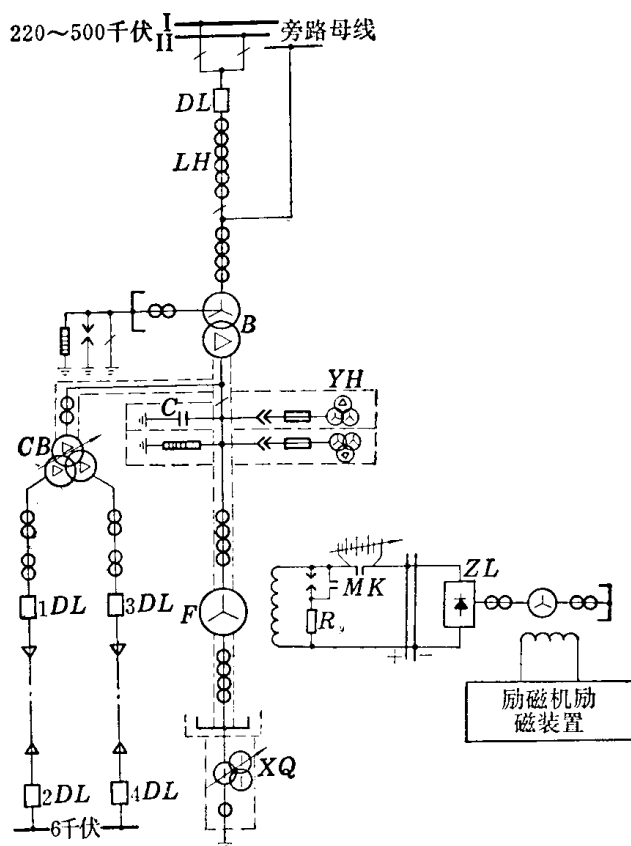


图 1-4-1 汽轮发电机双绕组变压器组的一次接线图 (50~60万千瓦)

表 1-4-1

大型汽轮发电机双绕组变压器组可能配置的继电

保护装置及其出口的控制对象表

序号	保护装置名称	组别	保护装置出口								处理方式	
			停汽 机	停锅 炉	跳 DL	跳 MK	跳 1DL 3DL	调汽 门	切换 励磁	跳母 联		发声 光信号
I	短路保护											
1	发电机差动保护	A	+	+	+	+	+					全 停
2	升压变压器差动保护	A	+	+	+	+	+					全 停
3	高压厂用变压器差动保护	A	+	+	+	+	+					全 停
4	发变组差动保护	B	+	+	+	+	+					全 停
5	全阻抗保护 t_1	B								+		母线解列
	t_2				+	+	+					解列灭磁
6	高压侧零序保护 t_1	B								+		母线解列
	t_2				+	+	+					解列灭磁
7	定子匝间短路保护	B	+	+	+	+	+					全 停
8	发电机励磁回路两点接地保护	B	+	+	+	+	+					全 停
II	异常运行保护											
9	定子一点接地保护 I 段	A									+	发 信 号
	II 段	B									+	发 信 号
10	发电机励磁回路一点接地保护	A									+	发 信 号
11	励磁机励磁回路一点接地保护	A									+	发 信 号
12	定子过负荷保护 定限时	A									+	发 信 号
	反限时				+	+	+					解列灭磁
13	转子表层过负荷保护 定限时	A									+	发 信 号
	反限时				+	+	+					解列灭磁
14	励磁回路过负荷保护 定限时	A									+	发 信 号
	反限时				+	+	+					解列灭磁
15	低频保护	B									+	发 信 号
16	失磁保护 t_0	A									+	发 信 号
	$t_1、t_3$				+	+	+					解列灭磁
	t_2						+	+	+			减出力
17	过电压保护	B			+	+	+					解列灭磁
18	逆功率保护 t_1	A									+	发 信 号
	t_2				+	+	+					解列灭磁
19	失步保护	B						+				增、减出力
20	变压器过激磁保护	B			+	+	+					解列灭磁
21	断路器失灵保护	B			+	+	+					解列灭磁